

マイクロアクチュエータによる広視野イメージング

著者	牧志 渉
号	54
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	工博第4239号
URL	http://hdl.handle.net/10097/62067

氏 名	まきし わたる
授 与 学 位	博士 (工学)
学位授与年月日	平成22年 3月25日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科、専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) ナノメカニクス専攻
学 位 論 文 題 目	マイクロアクチュエータによる広視野イメージング
指 導 教 員	東北大学教授 江刺 正喜
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 江刺 正喜 東北大学教授 羽根 一博 東北大学教授 桑野 博喜 東北大学准教授 田中 秀治

論文内容要旨

既存のイメージングデバイスは次の2つの課題を持っている。第一の課題は、人体内部や原子炉の配管など複雑な形状をした極端に狭く限られた空間ではイメージャを自在に操作して観察対象を詳細に観察することは難しいことであり、第二の課題は、1つのイメージングデバイスで広角領域の観察と、視野内の任意の一部のみを高解像度観察する機能(ズームイメージング)を実現することが難しいということである。本研究では、上記の課題を解決する方法として、イメージャとマイクロアクチュエータを組み合わせによる解決方法を提案し、それぞれの課題について具体的な応用用途を挙げながらデバイスの作製・評価までを行い、提案した課題解決方法を実証した。

第一の課題については、第2章で解決方法として、イメージャとマイクロアクチュエータを一体化したイメージングデバイスを搭載した能動電子内視鏡の提案を行った。能動電子内視鏡の先端部実装されているイメージングデバイスは、照明用LEDと光学系搭載したCCD/CMOSイメージャ部と、その根元に配置された形状記憶合金マイクロコイルアクチュエータによる屈曲機構により構成されている。この能動電子内視鏡は、屈曲機構により内視鏡先端のイメージャを自在に操作することが可能となり、対象物を自在に観察することが可能となる。形状記憶合金アクチュエータは電気的な信号により駆動されるためシャフト部に電気配線を通すだけで良く、操作性は内視鏡の形状に依存せず、また、シャフトを柔らかくすることが可能となるため、体内深部などの柔らかく複雑な形状をした極端に狭く限られた空間においても自在にイメージャ操作して対象物に向け観察が可能となる。

本研究では、上記の課題解決方法を実証するために、既存のイメージャデバイスを用いた内視鏡では、観察の難しいとされる人体の体内深部の観察を可能にする能動電子内視鏡の開発を目的とした。内視鏡は、対象とする体内の部位によって2種類の設計を行い、大腸用内視鏡と上部消化管用内視鏡の作製と評価を行い、提案をした課題解決方法の実証を行った。

大腸用内視鏡は、光学イメージャと駆動回路を積層した2枚のプリント基板に実装することにより硬性部を5mmと短く、外径9mm、屈曲部長さ60mmであり、最大屈曲角度は90°であった。

上部消化管用内視鏡は、細径で先端部の硬性部が短いほど、挿入性に優れ嘔吐感などの患者への負担が少なくなる。今回、細径化と硬性部の短縮を実現し、かつ、パーツを一体化し組立を簡略化するためにポリマーチューブへのフォトファブリケーションを行い、回路基板と配線を含む屈曲部パーツを作製した。本研究では、図1に示すように光学イメージャ実装基板と、屈曲機構の配線部の一体化を行った。これにより、内視鏡の組み立てが容易になり、また、より硬性部を短く、細径化を行うことが可能となる。基板には薄肉のポリマー基板を用い、基板上に回路形成後レーザーアブレーションにより屈曲部分の基板を平線ばね形状に加工し、単軸方向には曲がりやすく長軸方向へ変形し難い構造とした。このような基板構造を作製し図2に用い CCD イメージャと回路部品を実装することで、外径3.9mm、硬性部長さ15mmの内視鏡を実現できた。

作製した内視鏡の屈曲動作の様子を図3に示す。屈曲機構は任意の方向と角度への屈曲が可能であり、最大屈曲角度は98°(曲率半径20.5mm)であった。屈曲機構に用いるSMAアクチュエータはジュール熱により駆動を行っているため発熱する。駆動時に内視鏡の表面温度が41℃以下となる屈曲角度70°程度までの範囲で使用するのであれば、体内で安全に使用できると考えられる。

上記のようにして作製を行った能動電子内視鏡を用いて、形状記憶合金アクチュエータによる屈曲機構と、先端に搭載した CCD/CMOS イメージャ及び照明用白色 LED を用いることで、消化管モデル内の観察と見直し動作が可能であることを確認した。これらの結果より、本論文の第一の課題の解決方法を実証することができた。

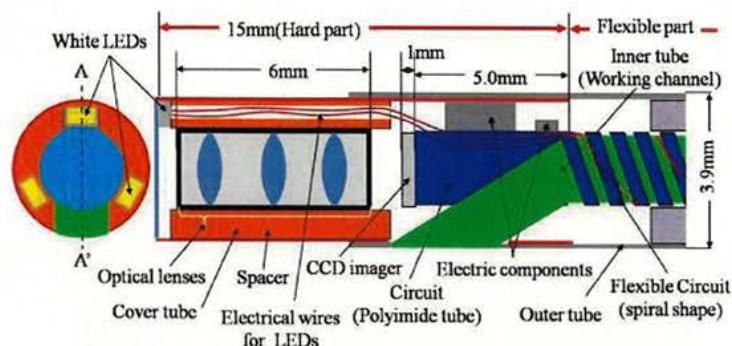


図1 上部消化管用内視鏡の CCD 実装部構造

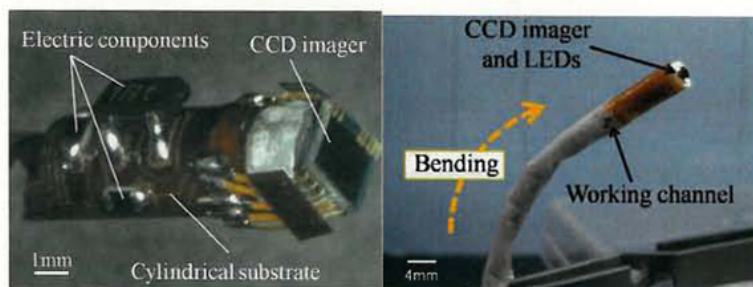


図2 CCD イメージャ実装部

図3 作製した上部消化管用内視鏡

第二の課題の解決方法として、第3章では、ミラースキャナデバイスと電磁駆動型非共振2軸マイクロアクチュエータを組み合わせたイメージングデバイスの提案を行った。スキャニング型のイメージャは、ミラースキャナによりレーザー光を投光・走査し反射光を検出することでイメージングを行っている。本研究では、広角領域イメージングでは走査角を大きくした状態でレーザー走査を行い、ズームイメージング時は、マイクロアクチュエータの非共振駆動によりミラースキャナのスキャニング中心を移動とスキャン領域の限定により、視野内の任意の一部の領域を高密度にスキャニングすることにより実現する。

本論文では、応用用途として車載用レーザーレーダを検討し、用途に合わせた仕様を持つ2軸非共振アクチュエータとミラースキャナの集積化を行ったイメージングデバイスの作製を行うことを目的とした。さらに、作製を行ったイメージングデバイスとTime of Flightを用いた距離取得装置と組み合わせることにより3次元距離画像のズームイメージングの実証とその有効性を示し、提案した解決方法による課題解決の実証を行った。

動車の安全運転を実現するためには、自動車前方を広く監視し、障害物や歩行者が存在する場合には、正確な位置の計測を行い、その対象物を認識することが求められる。しかし、レーザースキャニング型のイメージャでは、広視野イメージングと高分解能イメージングはトレードオフの関係にあり1つのデバイスで両立することは難しい。そこで本研究では、通常は、広角で走査線密度の低いスキャニングを行うことで広視野・低解像度イメージングを行い、その中に障害物などを検出した場合に、図4に示すようにその障害物の一部領域のみを走査線密度の高いスキャニングを行うことで解像度の高いイメージング（ズームイメージング）を行う方法を検討した。このようなイメージング方法を行うことで、広角イメージングと高分解能イメージングを同時に実現し、自動車前方の物体の検出と認識が可能となる。

本研究のミラースキャナデバイスの構成を図5に示す。前方の全景画像を取得する場合は、水平方向・垂直方向の両方を大きな走査角でスキャンを行い、広視野・低解像度のイメージングを行う。この時、視野内に障害物を検出した場合、ズームスキャニングを行い、観察領域を限定して高解像度のイメージングを行う。ズームイメージングを行うためには、ズームにより拡大したい部分が中心になるように非共振アクチュエータを駆動してスキャン中心の移動を行う。それと同時に内部の垂直用共振スキャナと、水平方向用非共振スキャナの振幅を小さくして、撮像領域を小さくする。

このように、撮像を行いたい領域を限定的にスキャンし走査間隔を集中させることで、画像のズームを実現することが可能となる。

このズームイメージングを行うためには、スキャン型イメージャのスキャン中心位置とスキャン範囲を自在に変化させる必要がある。そこで本研究では、共振ミラースキャナデバイスと、走査角が大きく、かつ、非共振2軸マイクロアクチュエータを組み合わせたイメージングデバイスを作製することで上記の機能を実現することを検討した。

本研究で検討を行った非共振アクチュエータは図5に示すように、ミラー構造体上に永久磁石、ミラー構造体の外側に電磁石を配置した構造となっている。そのため、ミラー構造体上には発熱が起こらず、蓄熱による破損の問題が生じない。ミラー構造体外側に置いた電磁石は、ミラー構造体に比べ放熱性に優れているため、大きな電力をコイルへの供給することができる。そのため、大きな磁界を発生することができるため、大きな回転トルクを発生することが可能となる。

非共振アクチュエータの上図におけるA-A'断面図は、図6のようになっており、このとき、外部に配置された電磁石によりスキャナ基板平面に平行な磁界を加える。すると、磁界に対して垂直なトーションバーに配置された永久磁石の極が、外部磁界に揃うように各極が電磁石に吸引、同時に反発し回転のモーメントが生じる。この回転トルクとトーションバーの軸が一致するため、トーションバーにねじれ回転が生じる。回転の角度は、この永久磁石と電磁石により生じたトーションバー周りのトルクと、トルクのねじり回転のばねによる力と釣り合った位置で決まる。

本研究では、永久磁石の振動により間接的に共振スキャナを駆動する方法を用いた。共振スキャナの構造は図5に示すように共振スキャナの外側の可動板に永久磁石を配置し、可動板を共振スキャナの共振周波数で永久磁石により振動させ、その可動板の振動により共振スキャナの駆動を行う。



図4 広視野イメージングとズームイメージングの概要

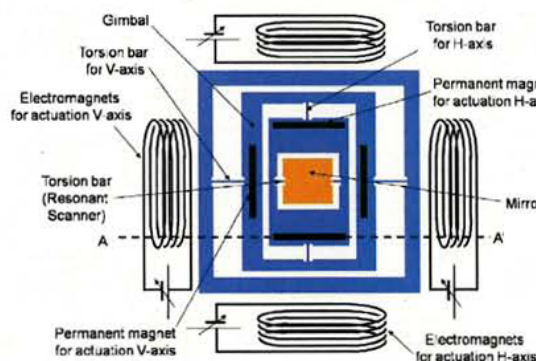


図5 ミラースキャナデバイスの構成

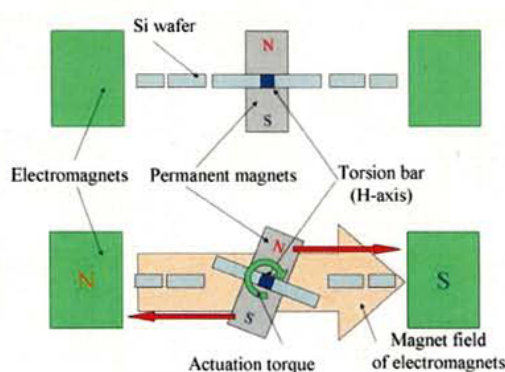


図6 非共振アクチュエータの駆動原理

スキャナデバイスの作製は、SOI ウェハ(50 / 2 / 250 μ m)へのフォトリソグラフィと DeepRIE を用いて作製を行い、その後、永久磁石の実装を行う。今回作製を行ったスキャナデバイスを図7に示す。作製を行ったスキャナデバイスは、縦9mm、横13mmであり、ミラーの大きさは5 \times 5mm²である。

非共振アクチュエータ垂を駆動した結果、直方向では、磁界強度が77mT (385mA)程度で光学走査角 $\pm 45^\circ$ (全角 90°)、水平方向では、磁界強度が88mT(457mA)程度で光学走査角 $\pm 45^\circ$ (全角 90°)を達成することができた。測定を行った光学走査角は、 $\pm 45^\circ$ までであるが、アクチュエータは破壊角度まで達していないため、さらに走査角を大きくすることが可

能であると考えられる。共振スキャナ部のトーションバー形状は、幅 $250\mu\text{m}$ 厚さ $50\mu\text{m}$ 、長さ 1.5mm である。作製を行った共振スキャナ部の共振周波数、 Q 値、共振時の光学走査角はそれぞれ、トーションバー幅 $250\mu\text{m}$: 共振周波数 1337.3Hz 、 Q 値 222.9 、光学走査角 $\pm 7.4^\circ$ (供給電流 26mA 時) となっていた。

ズームスキニングを行ったときの様子を図10に示す。走査条件は垂直方向を 1.5kHz の共振駆動、水平方向を 30Hz の非共振駆動によりスキニングを行っている。まず、全景スキニングを行うため、水平・垂直方向の走査角を 5° 程度で走査を行った図8③、その後、水平・垂直方向の走査角を 1° 程度で走査を行い高密度スキニングを行った図8⑤。さらに、非共振アクチュエータを用いてスキニング中心を水平方向へ移動図8⑥、垂直方向へ移動図8⑦を行い、任意の方向でズームスキニングが可能であることを確認した。

ズーム機能を検証するために、初めはミラースキャナのスキニング中心を移動させずにスキニングを行い前方全景の距離画像の取得を行った。前述のように水平・垂直方向の走査はともに非共振モードによるラスタスキニングによりミラー走査を行っている。視野角 12° で 40×40 画素 (1600 画素) の画像取得を行い、続いて、ミラースキャナのスキニング中心を移動させ、前景の一部のみを同じ画像分解能で距離画像の取得を行うズーム画像取得実験を行った。スキニング中心の移動は、元のスキニング中心から右側へ 0.7° 、下側へ 0.7° 移動させ、スキニング角度は 4° としてスキニングを行い得られたズーム画像が図9である。

作製を行った2軸非共振アクチュエータと共振スキャナを集積化したイメージングデバイスは、Time of Flightを用いた距離取得装置と組み合わせることにより3次元距離画像のズームイメージングの実証とその有効性を示した。これらの結果より、本論文の第二の課題の解決方法を実証することができた。

以上、本論文では、既存のイメージングデバイスの有する2つの課題をイメージャとマイクロアクチュエータを組み合わせによる解決方法を提案し、それぞれ具体的な応用用途として、体内深部の観察と治療を目的とした能動電子内視鏡、及び、車載用レーザーレーダの作製・評価までを行うことで課題解決の可能性を示した。これらの結果により既存のイメージングデバイスでは難しかった、視野内における任意の遠方領域の詳細観察や、極端に限られた空間内の観察といった、既存のイメージングデバイスでは観察が可能となることが期待される。

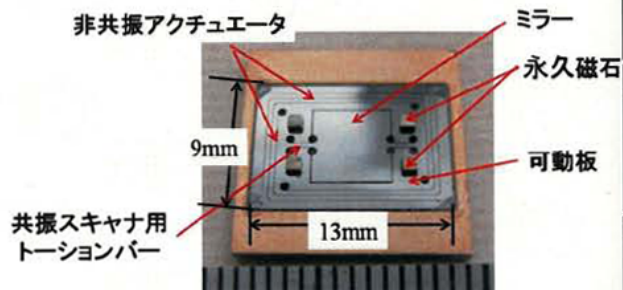


図7 ズームスキニング用スキャナデバイス

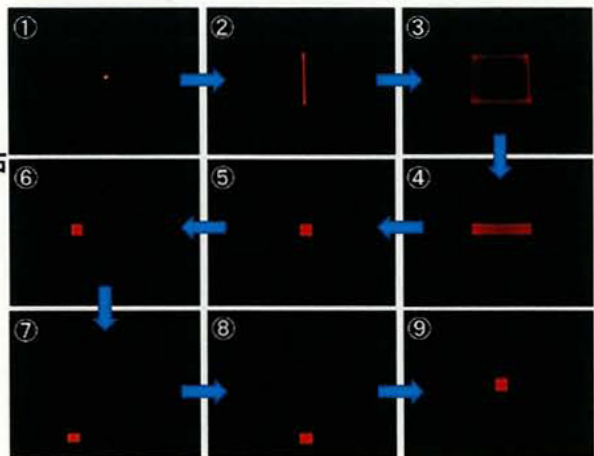


図8 ズームスキニング駆動の様子

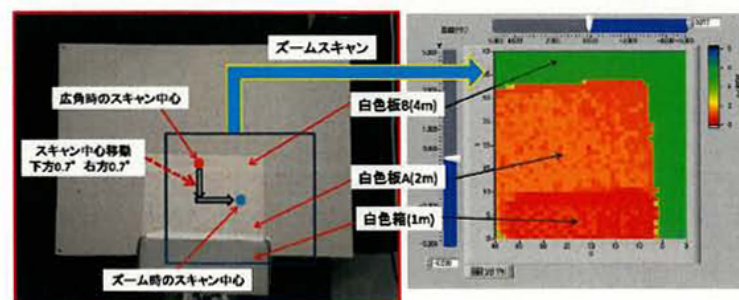


図9 ズームイメージング

論文審査結果の要旨

CCD・CMOS イメージャを中心としたイメージングデバイスは、近年の半導体加工技術の向上により撮像画素数の増加・高フレームレート化などが行われてきた。これにより、携帯電話やデジタルカメラなどの民生用途から、監視カメラやロボットビジョン、業務用テレビカメラといった産業用途、さらには内視鏡などの医療用途まで広く利用されている。しかし、既存のイメージングデバイスは以下の2つの課題がある。

第一の課題は、人体内部や原子炉の配管など複雑な形状をした、狭く限られた空間ではイメージャを自在に操作して対象を詳細に観察することが難しいことである。この課題の既存技術として内視鏡があるが、従来の内視鏡は外部からワイヤで牽引して先端の向きを変えるため、複雑な形状をした空間ではワイヤ牽引力を伝達できずに操作性が低下し、またシャフト部を硬くする必要があるため、柔軟な小腸深部などまで内視鏡を挿入して観察することは難しい。

第二の課題は1つのイメージングデバイスで、広角領域の観察と同時に視野内の任意の一部を拡大観察するズームイメージングが難しいことである。この課題の解決方法としては、ズーム光学系を操作して光学的ズームを行う方法があるが、その場合、駆動するシステムが大きく応答性が低くなる。

本論文は、上記の2つ課題を解決するため、イメージャとマイクロアクチュエータを一体化する方法を提案し、それぞれの課題について、具体的な応用用途に合わせてデバイスの作製・評価を行った結果をまとめたものであり、全4章からなる。

第1章は序論であり、イメージングデバイスの応用例の紹介を行い、既存のイメージングデバイスの課題を提起するとともに、本論文で行う課題の解決方法を説明している。

第2章では、第一の課題の解決方法として、CCD・CMOS イメージャと形状記憶合金マイクロアクチュエータを一体化した能動電子内視鏡の提案を行っている。この能動電子内視鏡は、マイクロアクチュエータによる屈曲機構で先端の向きを変えることが可能になり、狭い空間でも対象物を自在に観察することが可能となっている。形状記憶合金アクチュエータは電気的な信号により駆動されるため、シャフトを柔らかくすることが可能であるため、体内深部などの柔らかく複雑な形状をした極端に狭く限られた空間においても、自在にイメージャ操作して対象物に向け観察が可能となる。体内の小腸深部などにおいて、観察と処置が可能な能動電子内視鏡とその駆動システムの作製を行い、屈曲機構の動作およびイメージャによる撮像を確認し、課題解決の可能性を示している。

第3章では、第二の課題の解決方法として、ミラースキャナデバイスと電磁駆動型非共振2軸マイクロアクチュエータを組み合わせたイメージングデバイスの提案を行っている。スキャニング型のイメージャは、ミラースキャナによりレーザー光を投光・走査し反射光を検出することでイメージングを行っている。本論文では、電磁駆動により、走査角が大きく、かつ、非共振駆動が可能なマイクロアクチュエータを新たに開発することで、広角領域イメージング時は大きな走査角でレーザー走査を行い、ズームイメージング時はマイクロアクチュエータの非共振駆動によりミラースキャナのスキャニング中心を移動することにより視野内の任意の一部の領域を高密度にスキャニングしている。応用用途として車載用レーザーレーダを検討し、用途に合わせた仕様を持つ、2軸非共振アクチュエータとミラースキャナの集積化を行ったイメージングデバイスの作製を行っている。さらに、このイメージングデバイスと、光の飛行時間を用いた距離取得装置と組み合わせることにより3次元距離画像のズームイメージングを実証し、提案した方法による課題解決の可能性を示している。これは優れた成果である。

第4章では、結論を述べている。

以上、本論文では、既存のイメージングデバイスの有する2つの課題を、イメージャとマイクロアクチュエータの組み合わせで解決する方法を提案し、それぞれ具体的な応用用途を挙げながらデバイスの作製・評価までを行い課題解決の可能性を示している。これらの結果により既存のイメージングデバイスでは難しかった領域での観察が可能となり、ナノメカニクスに寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。